



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



# Evaluación de algoritmos de control para sistemas ABS en motocicletas

J. J. Castillo Aguilar, J. A. Cabrera Carrillo, A. J. Guerra Fernández, Enrique Carabias

Área de Ingeniería Mecánica.  
Departamento de Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos  
Universidad de Málaga.  
Noviembre, 2016



## Índice

- 1. Introducción**
- 2. Algoritmos de control**
- 3. Estimación mediante Filtro de Kalman**
- 4. Simulaciones**
- 5. Conclusiones**



## Introducción

- El sistema de frenado es probablemente el equipamiento de seguridad activa más importante de los vehículos automóviles. El ABS es el sistema de control más importante en lo relativo a frenado.
- El esfuerzo científico y la implantación de sistemas avanzados de control para la mejora de la seguridad (ABS, TCS, ...) se ha centrando mayoritariamente en los vehículos de cuatro ruedas.
- Hasta épocas recientes ha sido escasa la implantación de estos tipos de sistemas en motocicletas, debido a:
  - ✓ La complejidad de modelar su comportamiento dinámico, siendo difícil establecer la lógica que controle una inestabilidad en el vehículo.
  - ✓ Reticencias de los motociclistas a la incorporación de estos sistemas.



## Introducción

- El sistema de frenado es probablemente el equipamiento de seguridad activa más importante de los vehículos automóviles. El ABS es el sistema de control más importante en lo relativo a frenado.
- El esfuerzo científico y la implantación de sistemas avanzados de control para la mejora de la seguridad (ABS, TCS, ...) se ha centrando mayoritariamente en los vehículos de cuatro ruedas.
- Hasta épocas recientes ha sido escasa la implantación de estos tipos de sistemas en motocicletas, debido a:
  - ✓ La complejidad de modelar su comportamiento dinámico, siendo difícil establecer la lógica que controle una inestabilidad en el vehículo.
  - ✓ Reticencias de los motociclistas a la incorporación de estos sistemas.



## Introducción

- El sistema de frenado es probablemente el equipamiento de seguridad activa más importante de los vehículos automóviles. El ABS es el sistema de control más importante en lo relativo a frenado.
- El esfuerzo científico y la implantación de sistemas avanzados de control para la mejora de la seguridad (ABS, TCS, ...) se ha centrando mayoritariamente en los vehículos de cuatro ruedas.
- Hasta épocas recientes ha sido escasa la implantación de estos tipos de sistemas en motocicletas, debido a:
  - ✓ La complejidad de modelar su comportamiento dinámico, siendo difícil establecer la lógica que controle una inestabilidad en el vehículo.
  - ✓ Reticencias de los motociclistas a la incorporación de estos sistemas.

## Introducción

**Consecuencia:** mayor número de accidentes en los que la motocicleta está involucrada, especialmente cuando el conductor no tiene la suficiente experiencia en su conducción. Este hecho queda reflejado en los informes de siniestralidad que publica todos los años la DGT.

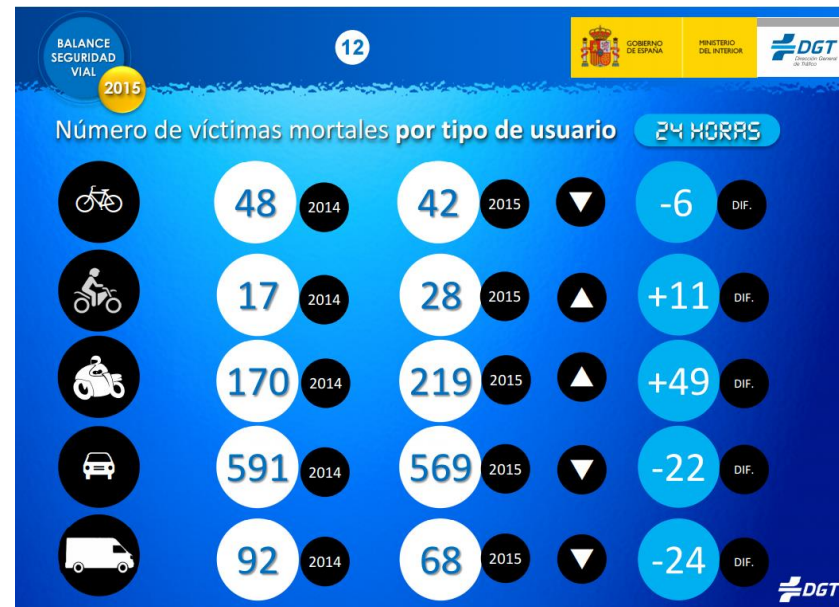
Tipo de Vehículo	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Bicicleta	3%	3%	3%	3%	4%	4%	5%	6%	7%	8%
Ciclomotor	19%	18%	17%	15%	13%	11%	10%	9%	8%	8%
Motocicleta	13%	15%	18%	19%	20%	21%	22%	22%	22%	24%
Turismo	80%	79%	79%	79%	79%	80%	80%	80%	80%	77%
Vehículo mercancías	18%	18%	19%	17%	15%	15%	14%	14%	13%	16%
Autobús	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%



*Evolución de la distribución de los accidentes con víctimas por tipo de vehículo (% de accidentes con implicación de al menos un vehículo del tipo considerado).*

## Introducción

**Consecuencia:** mayor número de accidentes en los que la motocicleta está involucrada, especialmente cuando el conductor no tiene la suficiente experiencia en su conducción. Este hecho queda reflejado en los informes de siniestralidad que publica todos los años la DGT.



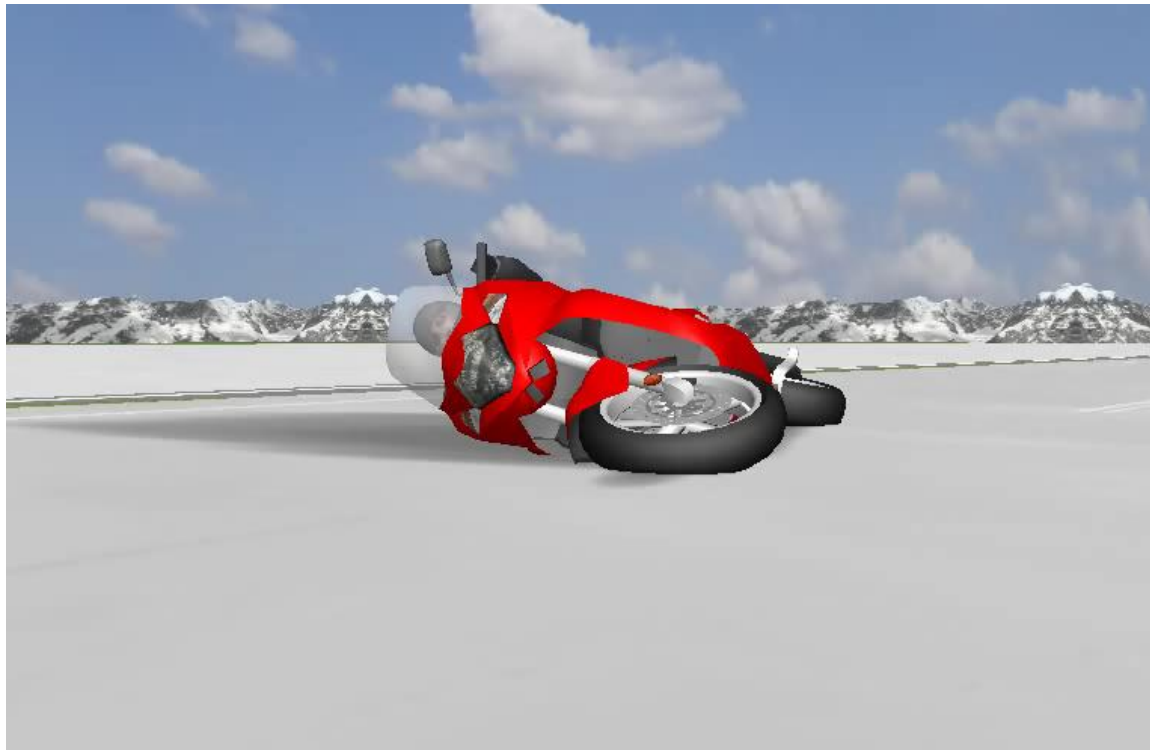
*Víctimas mortales por tipo de usuario 2014-2015*

## Introducción

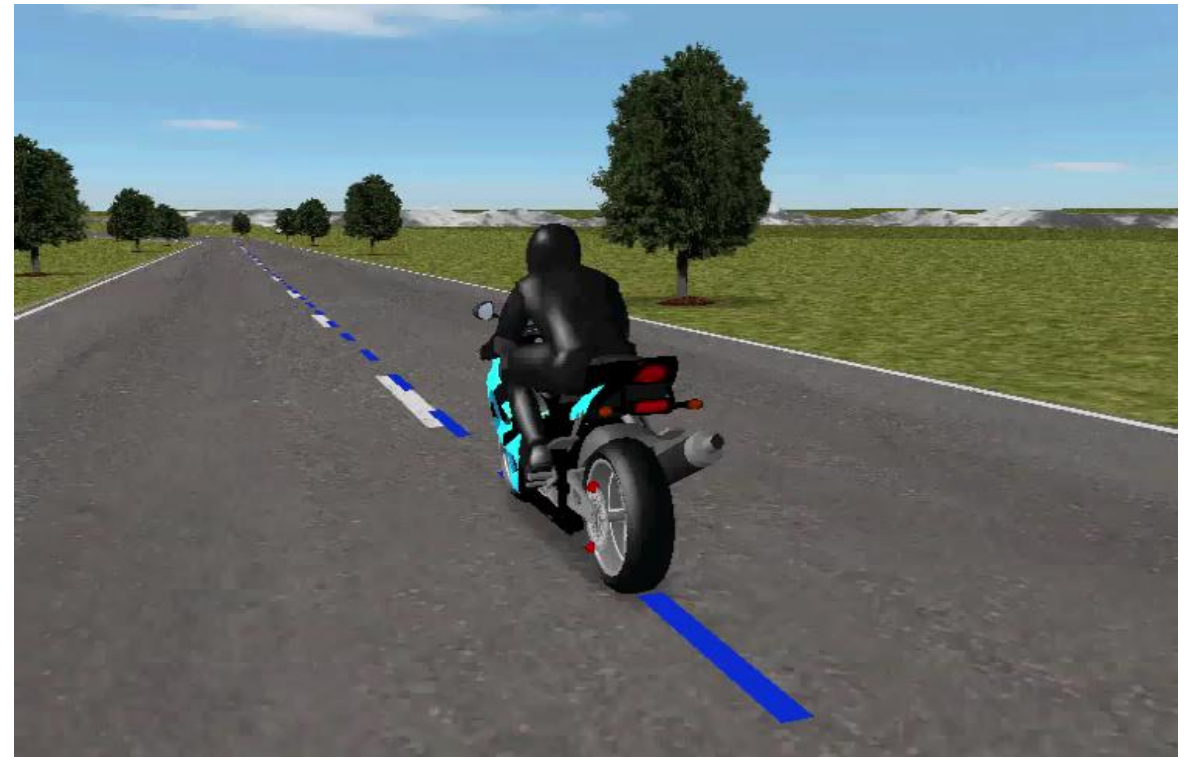
Frenada en vehículos de 4 ruedas vs 2 ruedas		
	4 ruedas	2 ruedas
<b>Bloqueo rueda delantera</b>	Pérdida capacidad para direccionar al vehículo, aumento de distancia de frenado	Pérdida de control direccional, aumento de distancia de frenado, inestabilidad, <b>alto riesgo de caída</b>
<b>Bloqueo rueda trasera</b>	Inestabilidad direccional	Inestabilidad direccional
<b>Frenada en superficie muy adherente</b>	Gran deceleración	Gran deceleración, <b>posibilidad de stoppie</b>
<b>Uso de freno trasero (Frenada de emergencia)</b>	Aporta aprox. 25-30 % de la fuerza de frenado	<b>Aportación marginal.</b>
<b>Frenada en curva</b>	Riesgo moderado	Disminución de adherencia lateral, <b>alto riesgo de deslizamiento de rueda delantera</b>



## Introducción

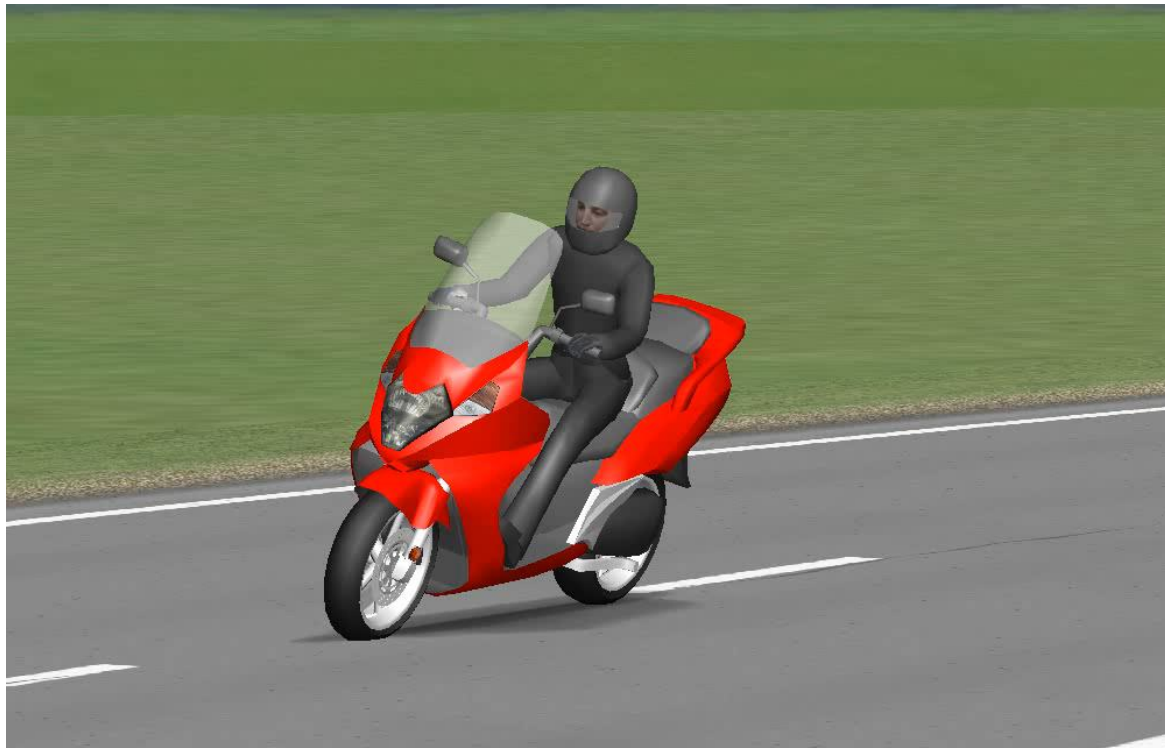


*Bloqueo rueda delantera*

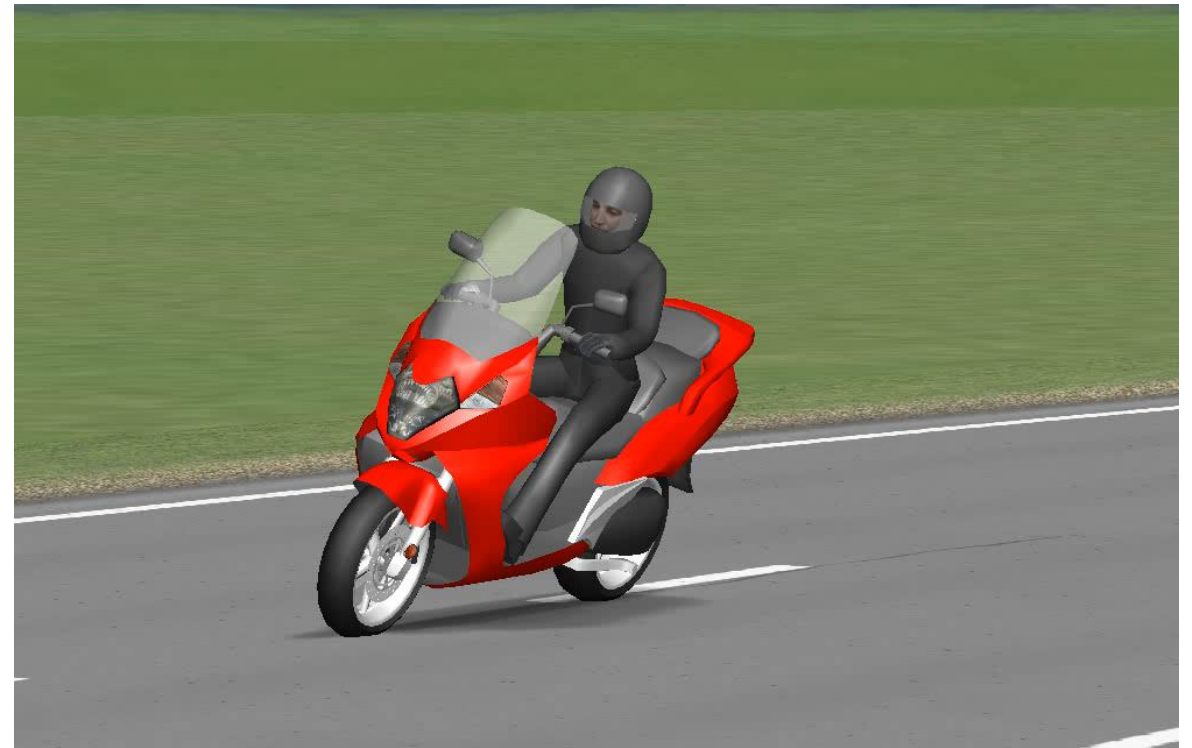


*Stoppie*

## Introducción



*Bloqueo rueda delantera curva*



*Bloqueo rueda trasera curva*

## Algoritmos de control ABS

- El objetivo de un sistema ABS es evitar el bloqueo de las ruedas en situaciones de frenada de emergencia.
- A continuación se describirán algoritmos de control para sistemas ABS basados en:
  - ✓ Proporcional integral (PI)
  - ✓ Control deslizante
  - ✓ Control difuso
  - ✓ Control convencional
- La acción de control proporcionada en todos los casos por los algoritmos es **la presión de frenado**.

### Algoritmos de control ABS

- El objetivo de un sistema ABS es evitar el bloqueo de las ruedas en situaciones de frenada de emergencia.
- A continuación se describirán algoritmos de control para sistemas ABS basados en:
  - ✓ Proporcional integral (PI)
  - ✓ Control deslizante
  - ✓ Control difuso
  - ✓ Control convencional
- La acción de control proporcionada en todos los casos por los algoritmos es **la presión de frenado**.

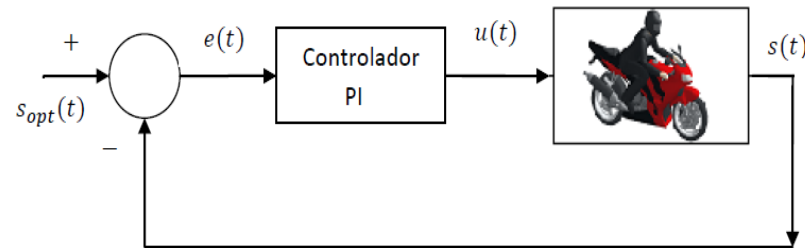


## Algoritmos de control ABS

- El objetivo de un sistema ABS es evitar el bloqueo de las ruedas en situaciones de frenada de emergencia.
- A continuación se describirán algoritmos de control para sistemas ABS basados en:
  - ✓ Proporcional integral (PI)
  - ✓ Control deslizante
  - ✓ Control difuso
  - ✓ Control convencional
- La acción de control proporcionada en todos los casos por los algoritmos es **la presión de frenado**.

## Algoritmos de control: Proporcional integral (PI) - realimentación

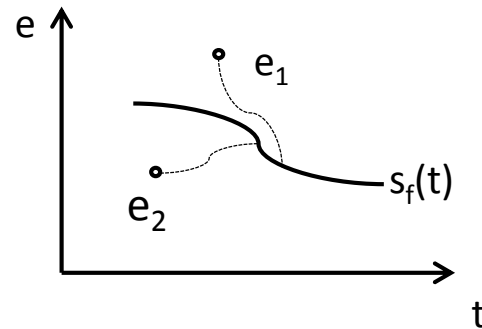
- La entrada al PI es la señal de error, definida esta como la diferencia entre el deslizamiento óptimo para la superficie objeto de ensayo y el deslizamiento real en cada instante de tiempo.



- La ecuación básica que representa el controlador PI es la siguiente: 
$$u(t) = k_p e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau$$
- Donde  $e(t)$  viene dado por: 
$$e(t) = s_{opt}(t) - s(t)$$
- Los parámetros a obtener en este caso son el término proporcional, **K<sub>p</sub>**, y el término integral, **T<sub>i</sub>**, para los controladores de la rueda delantera y la trasera (4 parámetros).

### Algoritmos de control: Control deslizante\*

- Se diseña una ley de control que permita atraer y estabilizar el sistema en una superficie en el espacio de estados conocida como superficie de deslizamiento  $S_f(t)$ .



- Se buscará una función que haga cero el error de seguimiento en régimen permanente. En nuestro caso:

$$s_f = e(t) + K_{1f} \int_0^t e(\tau) d\tau$$

\* Xiangwen Zhang, Yong Xu, Ming Pan, Fenghua Ren. A vehicle ABS adaptative sliding-mode control algorithm based on the vehicle velocity estimation and tyre/road friction coefficient estimations.. School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, (2014), 477-501.



## Algoritmos de control: Control deslizante

- Utilizando el modelo dinámico de la motocicleta, se llega a que el par de frenado que puede hacer que el error sea 0 es:

$$T_{bf} = -\hat{b}_f^{-1}[\hat{g}_f - \dot{\lambda}_{f0} + k_{1f}e_f + K_{2f}\arctan(s_f)]$$

- Dónde:

$$\hat{g}_r = \frac{\omega_r R a_x}{\hat{v}_x^2} + \frac{(f_2 + \frac{mgR\sigma_v L_f \hat{v}_x}{L} + \sigma_\omega \omega_f)R}{J\hat{v}_x}, \quad b_f = \frac{R}{J\hat{v}_x},$$

- El  $\hat{\phantom{x}}$  indica que los parámetros no son exactos y que dependen de un error variable (pero limitado).
- El factor  $k_{1f}$  permite optimizar el controlador. El factor  $K_{2f}$  se impone para garantizar la estabilidad del controlador.



### Algoritmos de control: Control difuso\*

- El bloque borroso utilizado tiene como variables de entrada el error de deslizamiento en función del tiempo y la diferencia de dicho error:

$$e(t) = s_{opt} - s(t)$$

$$diferror(t) = e(t) - e(t-1)$$

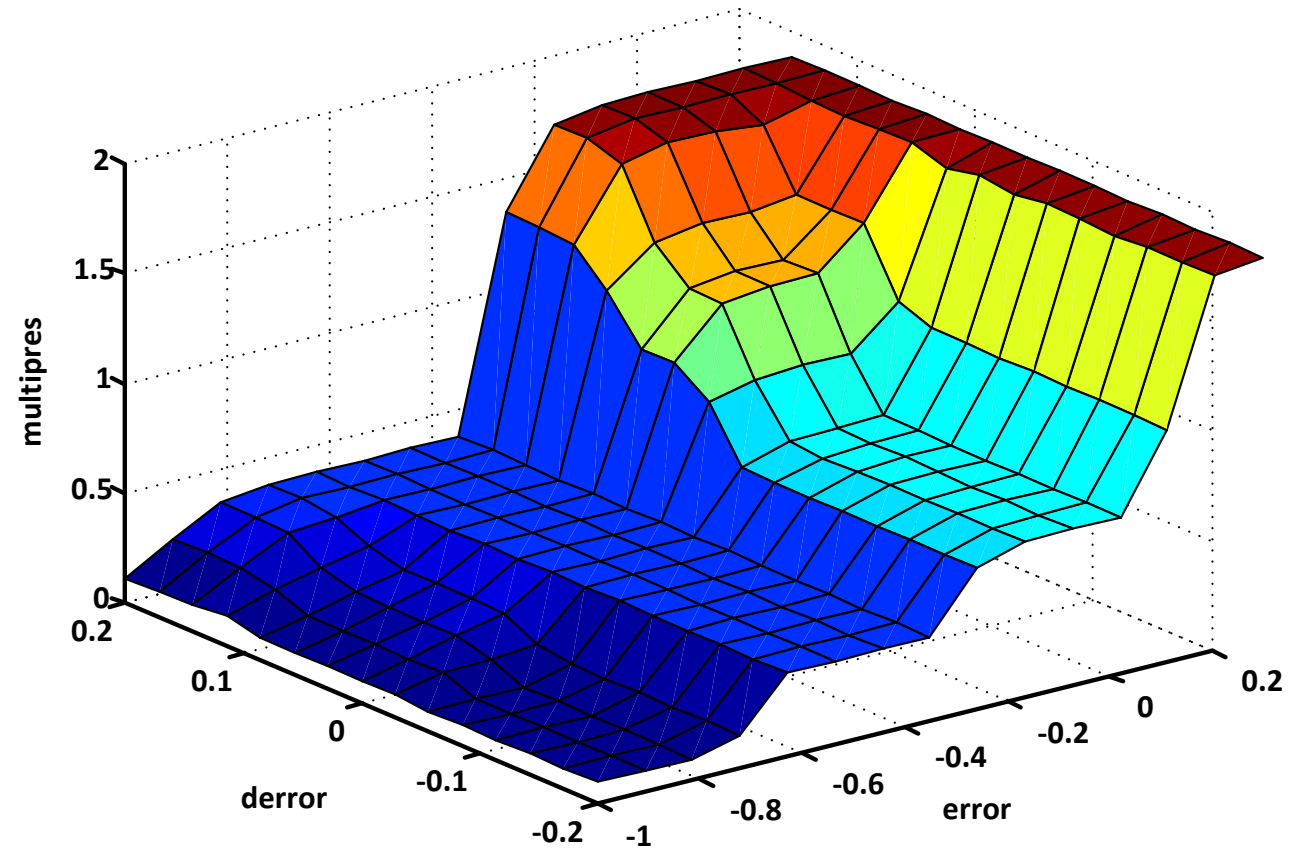
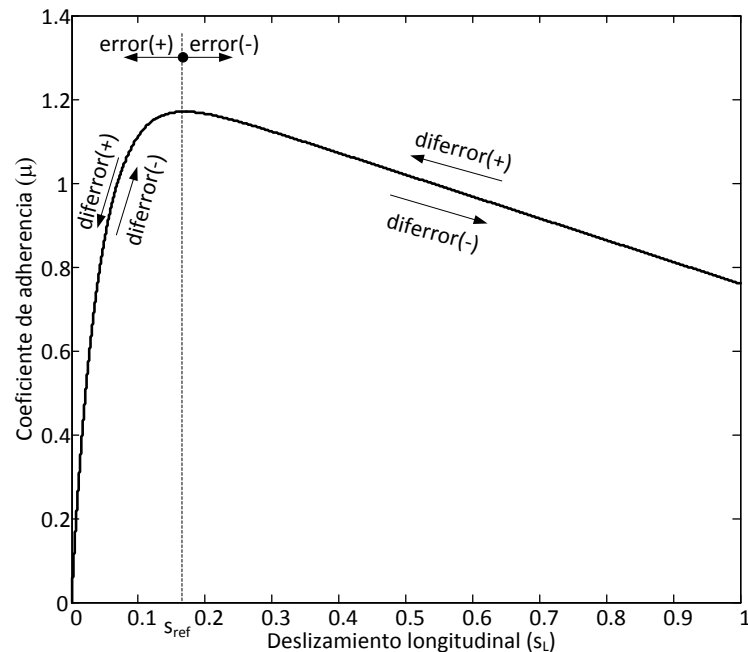
- En función de los valores calculados, se obtendrá como salida una variable que hemos denominado **multipres**, la cual es un factor multiplicador de la presión de frenado aplicado en el instante anterior.

$$P(t) = multipres \cdot P(t-1)$$

\* J.J. Castillo, J.A. Cabrera, A.J. Guerra, A. Simon, A Novel Electro-Hydraulic Brake System with Tire-Road Friction Estimation and Continuous Brake Pressure Control. IEEE Trans. on Ind. Electr. 63:3, (2016), 1863-1875.

## Algoritmos de control: Control difuso

- Una vez definidas las funciones de pertenencia se obtiene la siguiente superficie de control del bloque borroso.



### Algoritmos de control: Control difuso / cabeceo

- Además es preciso introducir para la moto de categoría deportiva un control adicional para la rueda delantera.
- Debido a la alta tendencia de este tipo de motos a bloquear la rueda delantera y a girar sobre sí misma (hacer un invertido) se ha creado un control para que limitar el ángulo de cabeceo durante toda la frenada.
- Así, al igual que en el caso anterior, la salida del bloque fuzzy será un multiplicador sobre la presión de frenado.

$$P(t) = \text{multipres} \cdot \text{multicab} \cdot P(t-1)$$

- El objetivo es reducir la presión una vez se detecte un alto ángulo o velocidad de cabeceo.

### Algoritmos de control: Control difuso / cabeceo

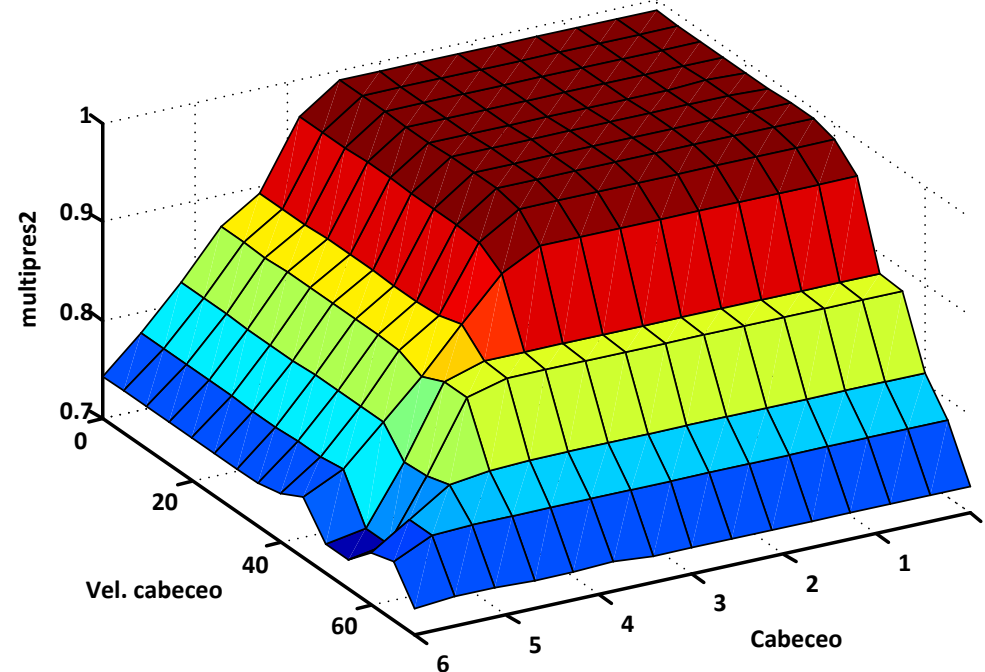
- Además es preciso introducir para la moto de categoría deportiva un control adicional para la rueda delantera.
- Debido a la alta tendencia de este tipo de motos a bloquear la rueda delantera y a girar sobre sí misma (hacer un invertido) se ha creado un control para que limite el ángulo de cabeceo durante toda la frenada.
- Así, al igual que en el caso anterior, la salida del bloque fuzzy será un multiplicador sobre la presión de frenado.

$$P(t) = \text{multipres} \cdot \text{multicab} \cdot P(t-1)$$

- El objetivo es reducir la presión una vez se detecte un alto ángulo o velocidad de cabeceo.

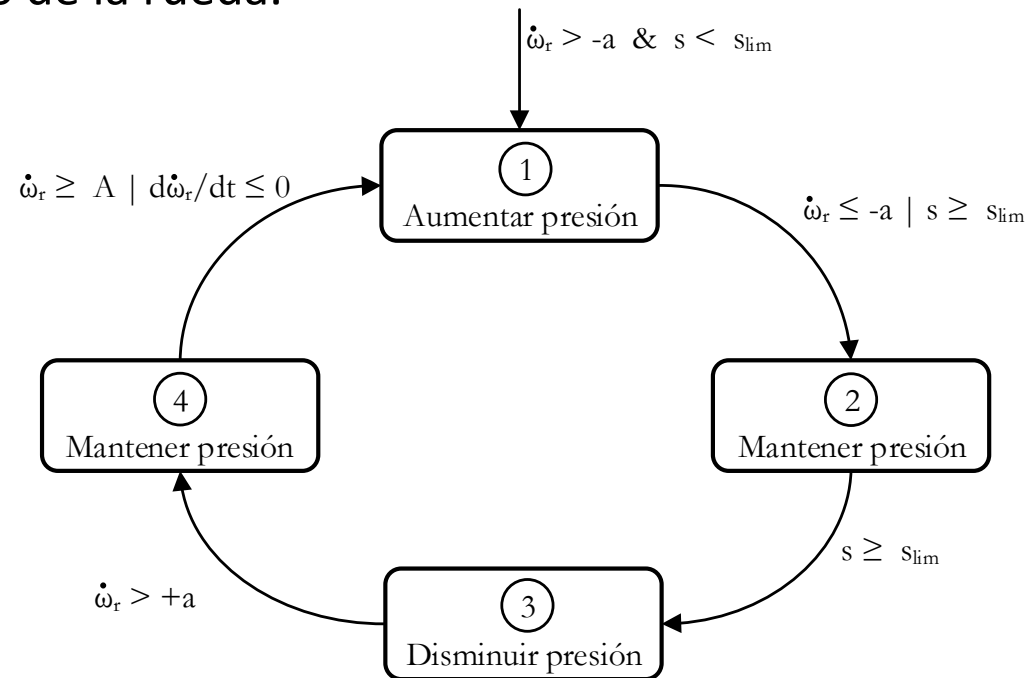
### Algoritmos de control: Control difuso / cabeceo

- El rango establecido para la variable ángulo de cabeceo es de  $[0, +6]$  siendo 6 el máximo admisible sin que gire. La variable de salida multicab está acotada entre  $[0, 1]$  ya que trata de reducir la presión de salida del bloque anterior en caso necesario.



### Algoritmos de control: Control convencional\*

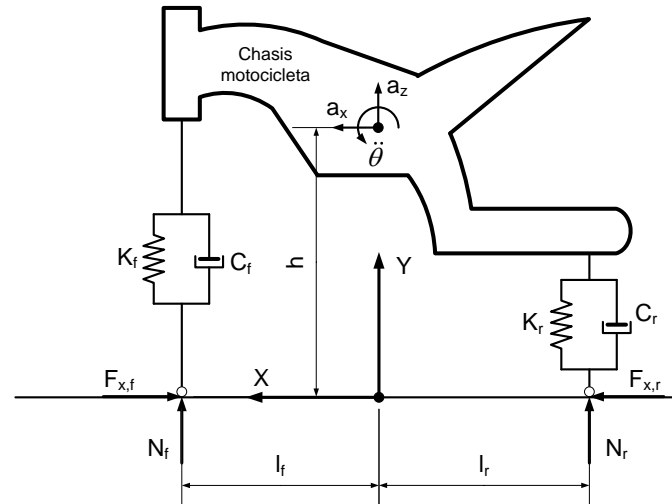
- Hace uso del del deslizamiento y de la deceleración periférica de la rueda como criterios para la determinación del bloqueo de la rueda.



\* Bosch. Sistemas de freno convencionales y electrónicos. 3ª ed. Alemania: Robert Bosch GmbH, 2003. ISBN: 3-934584-61-6.

## Estimación mediante EKF

- Se ha utilizado un filtro de Kalman Extendido de Kalman (EKF) para obtener la velocidad longitudinal de la moto, los esfuerzos verticales, el esfuerzo longitudinal en el neumático delantero.
- Se hace uso del siguiente modelo simplificado de motocicleta:



## Estimación mediante EKF

- En este caso los valores del vector de variables de estado son:

$$x(k) = \begin{bmatrix} F_{x,r}(k) \\ N_r(k) \\ N_f(k) \\ v_x(k) \end{bmatrix} = f_{k-1}(x_{k-1}) = \begin{bmatrix} F_{x,r}(k-1) \\ N_r(k-1) \\ N_f(k-1) \\ v_x(k-1) + \Delta t \left( \frac{F_{x,r}(k-1) - C v_x^2(k-1)}{M} \right) \end{bmatrix}$$

- El vector de medidas es:

$$j(k) = \begin{bmatrix} a_x(k) \\ a_z(k) \\ \dot{\theta}(k) \end{bmatrix} = h_k(x_k) = \begin{bmatrix} \frac{F_{x,r}(k) - C v_x^2(k)}{M} \\ \frac{N_f(k) + N_r(k) - Mg}{M} \\ \frac{N_r(k)l_r - N_f(k)l_f - (F_{x,r}(k))z(k)}{I_y} \end{bmatrix}$$



## Estimación mediante EKF

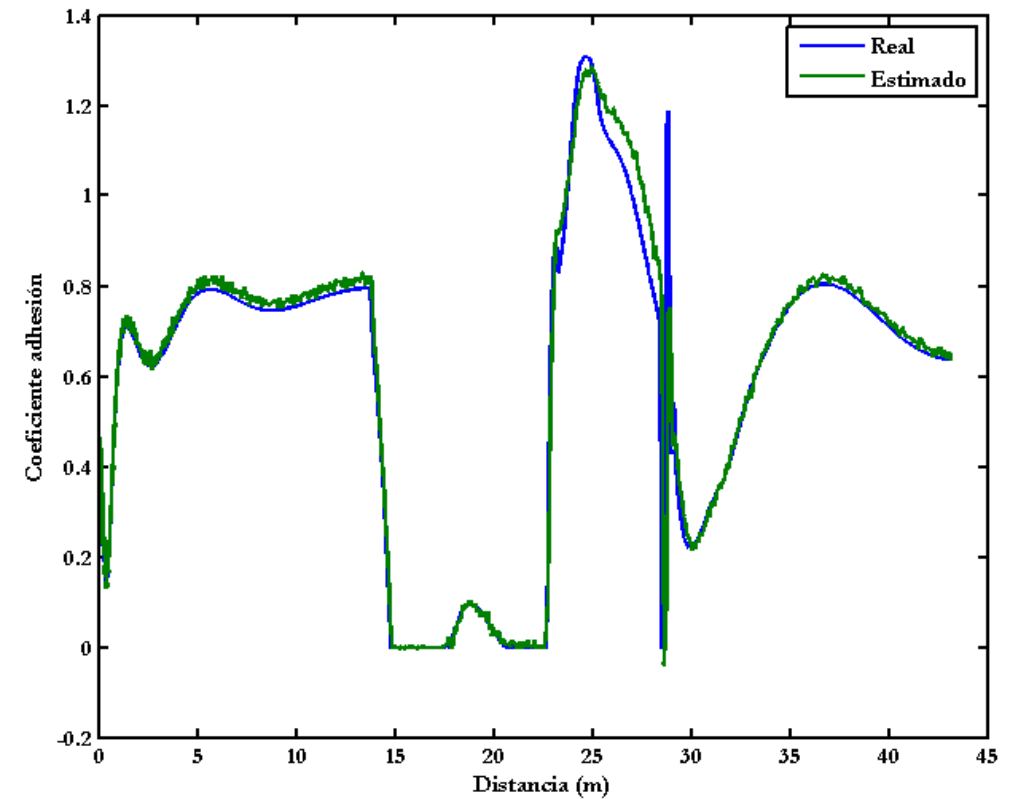
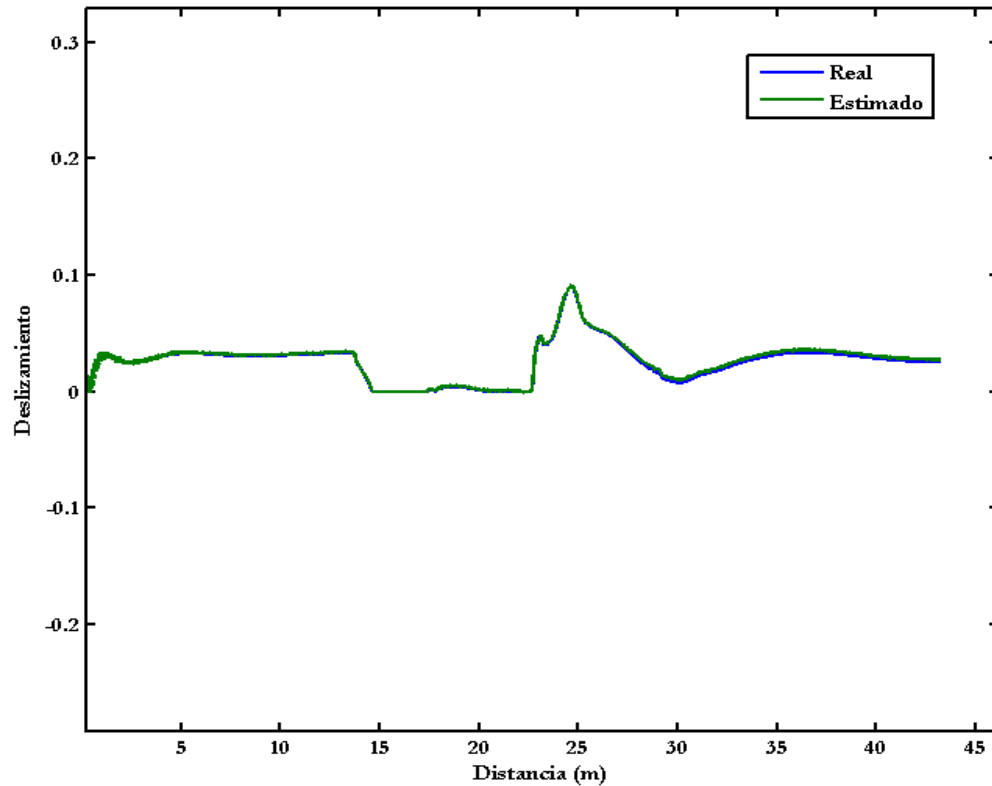
- En este caso los valores del vector de variables de estado son:

$$x(k) = \begin{bmatrix} F_{x,r}(k) \\ N_r(k) \\ N_f(k) \\ v_x(k) \end{bmatrix} = f_{k-1}(x_{k-1}) = \begin{bmatrix} F_{x,r}(k-1) \\ N_r(k-1) \\ N_f(k-1) \\ v_x(k-1) + \Delta t \left( \frac{F_{x,r}(k-1) - C v_x^2(k-1)}{M} \right) \end{bmatrix}$$

- Con estos valores estimados es posible estimar el deslizamiento y el coeficiente de fricción a partir de:

$$s_{k,est} = 1 - \frac{v_k(k)}{w_r(k) \cdot R_r} \qquad \mu_{k,est} = \frac{F_{x,r}(k)}{N_r(k)}$$

## Estimación mediante EKF: Ejemplo



## Simulaciones: Vehículos



Parámetro	Símbolo	Unidad	Cruiser	Sport
Coefficiente de resistencia a la rodadura	$\sigma_v$	-	0,005	0,005
Distancia entre el centro de gravedad y el eje delantero	$l_f$	m	0,859	0,56
Distancia entre en centro de gravedad y el eje trasero	$l_r$	m	0,68	0,81
Coefficiente de resistencia viscosa	$\sigma_w$	-	1	1
Distancia entre eje delantero y trasero	$L$	m	1,539	1,37
Inercia rotacional de las ruedas delantera y trasera	$J$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	1,5	1,5
Suma de la masa de la moto y el piloto	$M$	kg	230	230
Altura del centro de gravedad	$h$	m	0,532	0,532
Deslizamiento óptimo	$\lambda_{\text{opt}}$	-	0,2	0,2
Radio de la rueda	$R$	m	0,29	0,29
Constantes	$C_1, C_2 \text{ y } C_3$	-	0,1	0,1

## Simulaciones: Parámetros optimizados para cada algoritmo usando GA

### Control deslizante

Tipo de motocicleta	Rueda	K1
Cruiser	Delantera	450
Cruiser	Trasera	100
Sport	Delantera	20
Sport	Trasera	20

### Control PI

Tipo de motocicleta	Rueda	Kp	Ti
Cruiser	Delantera	90	0.2
Cruiser	Trasera	106	0.1
Sport	Delantera	40	421
Sport	Trasera	106	145

### Control Convencional

Tipo de motocicleta	Rueda	A	+a	-a
Cruiser	delantera	12	-33	-138
	trasera	44	-86	-141
Sport	delantera	-10	-11	-12
	trasera	10	-15	-120



### Simulaciones

- Se presentan los resultados sobre asfalto seco, asfalto mojado y multi-superficie en línea recta con velocidades iniciales de 80, 60 y 80 km/h respectivamente.
- En todos los casos la velocidad final es 10 km/h.
- El ensayo multi-superficie se desarrolla sobre tres superficies diferentes: asfalto seco, asfalto mojado y gravilla mojada. Los cambios de superficie se realizan a los 10 metros de frenada y a los 20, de forma que en el intervalo  $[0, 10]$  se circula sobre asfalto seco, en  $[10, 20]$  sobre asfalto mojado y en  $[20, \infty]$  sobre gravilla mojada.

### Simulaciones

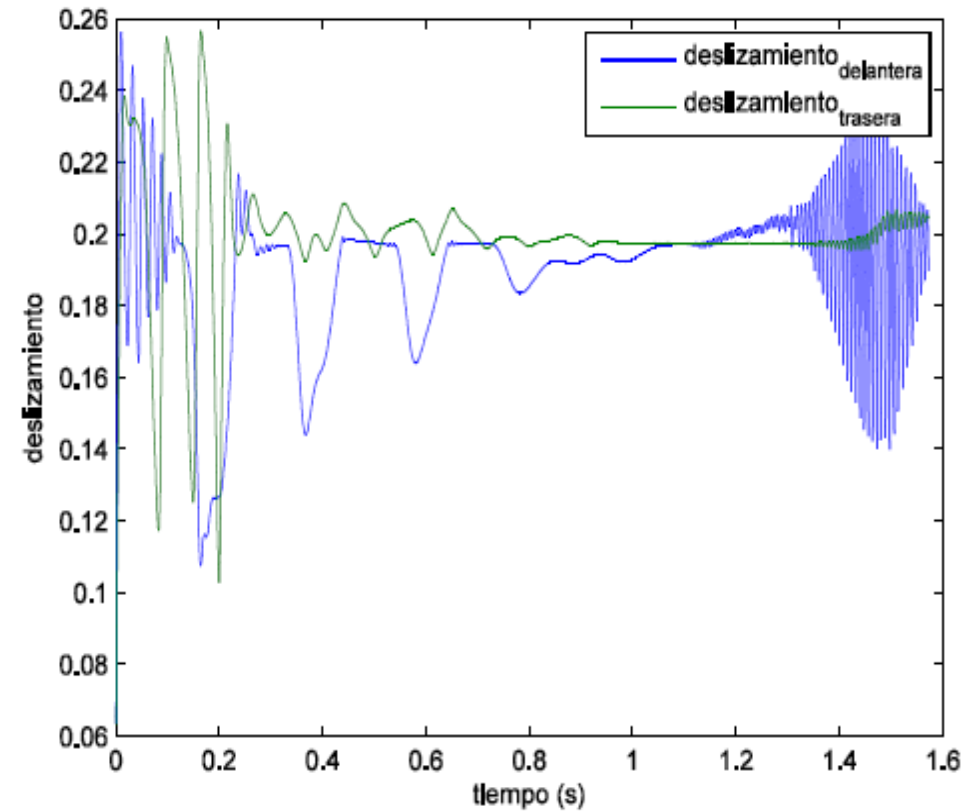
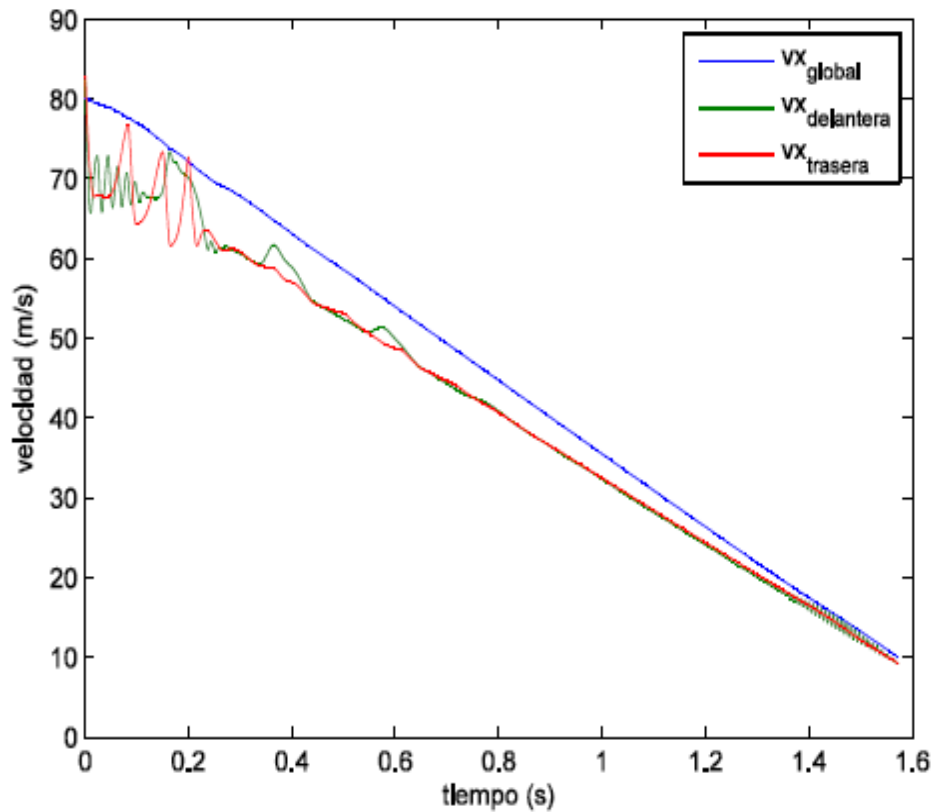
- Se presentan los resultados sobre asfalto seco, asfalto mojado y multi-superficie en línea recta con velocidades iniciales de 80, 60 y 80 km/h respectivamente.
- En todos los casos la velocidad final es 10 km/h.
- El ensayo multi-superficie se desarrolla sobre tres superficies diferentes: asfalto seco, asfalto mojado y gravilla mojada. Los cambios de superficie se realizan a los 10 metros de frenada y a los 20, de forma que en el intervalo  $[0, 10]$  se circula sobre asfalto seco, en  $[10, 20]$  sobre asfalto mojado y en  $[20, \infty]$  sobre gravilla mojada.



### Simulaciones

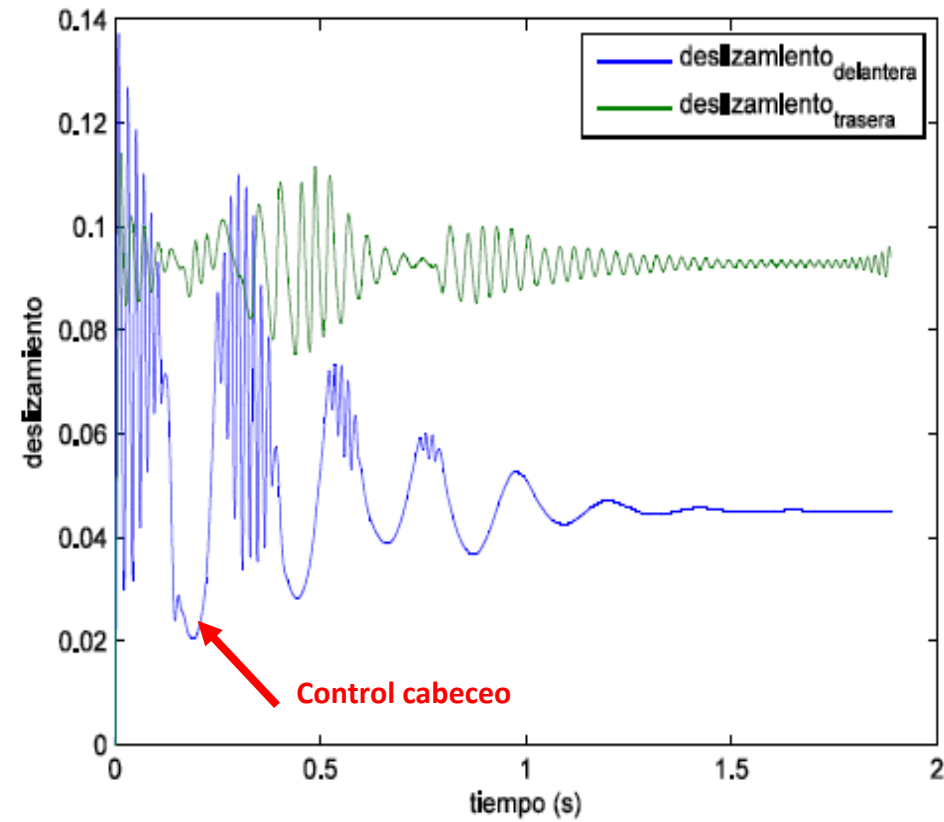
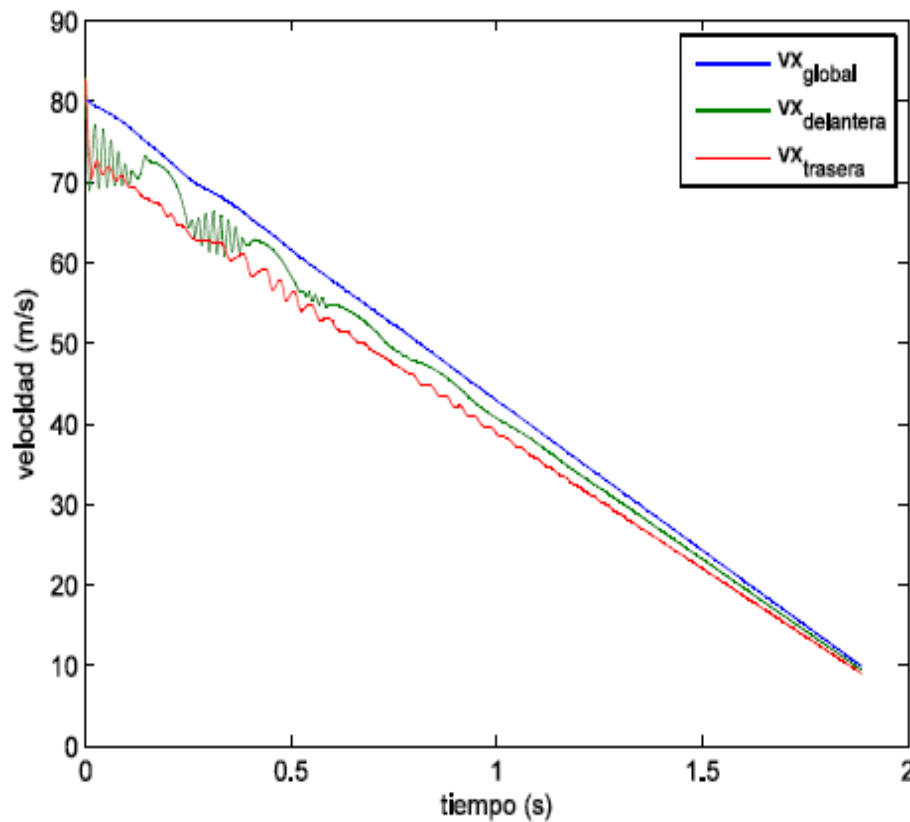
- Se presentan los resultados sobre asfalto seco, asfalto mojado y multi-superficie en línea recta con velocidades iniciales de 80, 60 y 80 km/h respectivamente.
- En todos los casos la velocidad final es 10 km/h.
- El ensayo multi-superficie se desarrolla sobre tres superficies diferentes: asfalto seco, asfalto mojado y gravilla mojada. Los cambios de superficie se realizan a los 10 metros de frenada y a los 20, de forma que en el intervalo  $[0, 10]$  se circula sobre asfalto seco, en  $[10, 20]$  sobre asfalto mojado y en  $[20, \infty]$  sobre gravilla mojada.

## Simulaciones: Borroso / Cruiser – asfalto seco

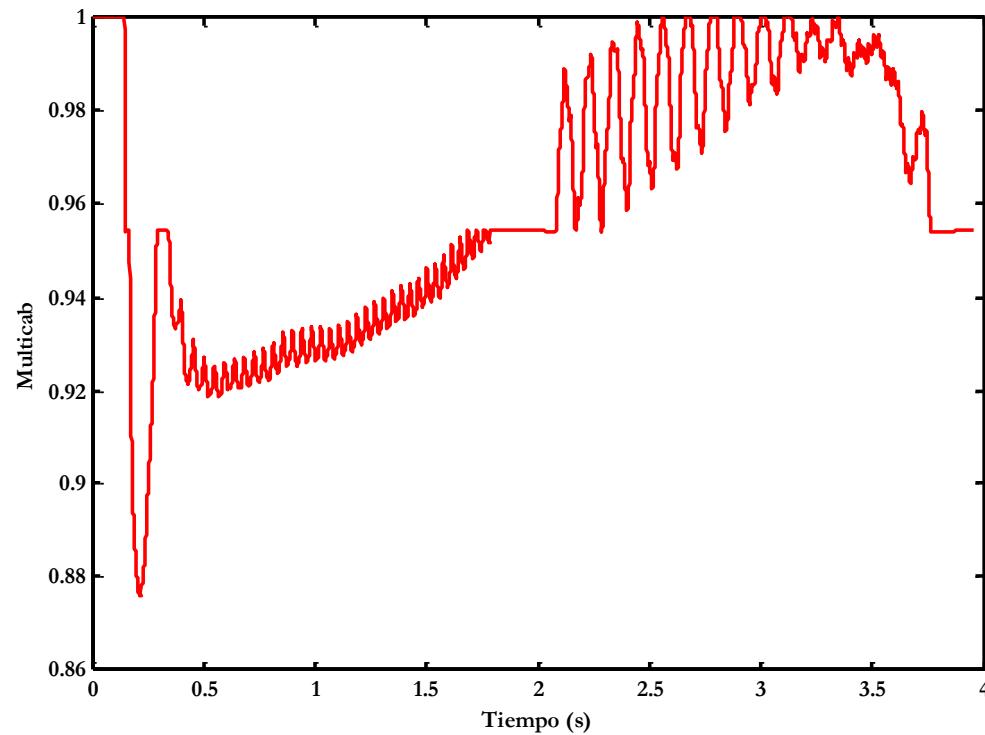




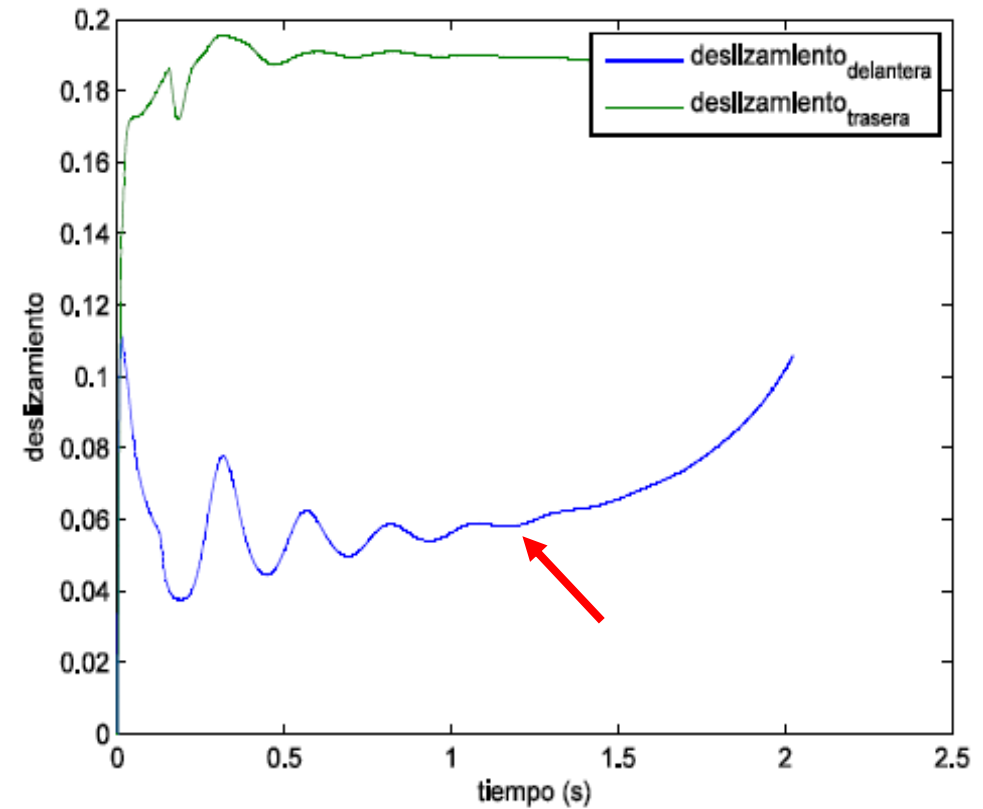
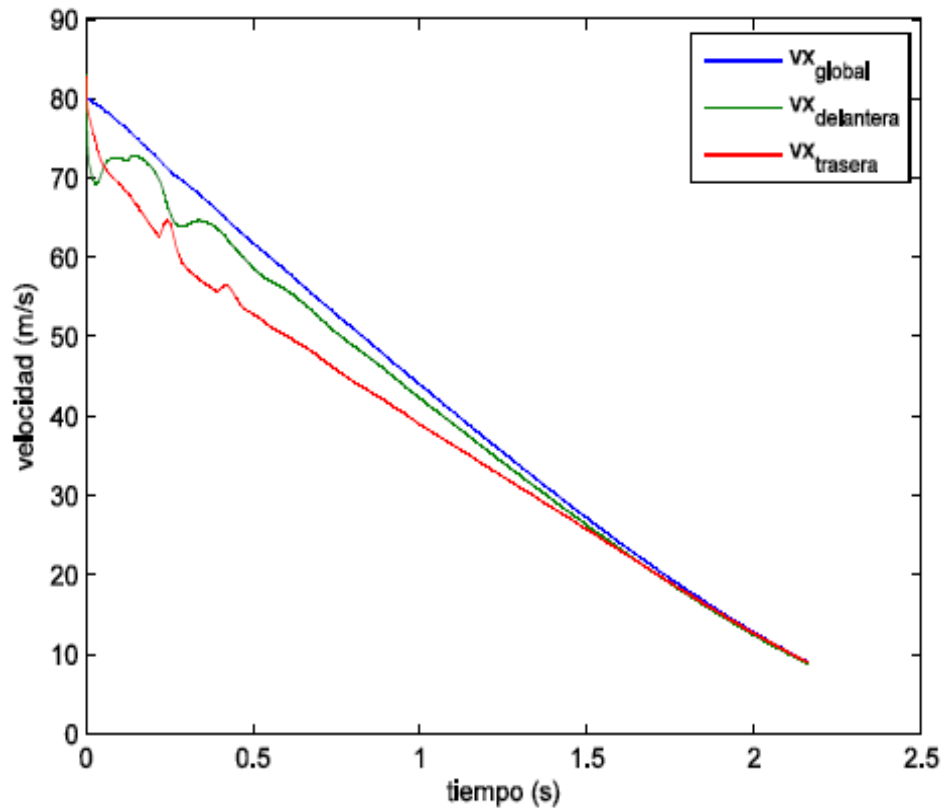
## Simulaciones: Borroso / Sport con control cabeceo – asfalto seco



## Simulaciones: Borroso / Sport con control cabeceo

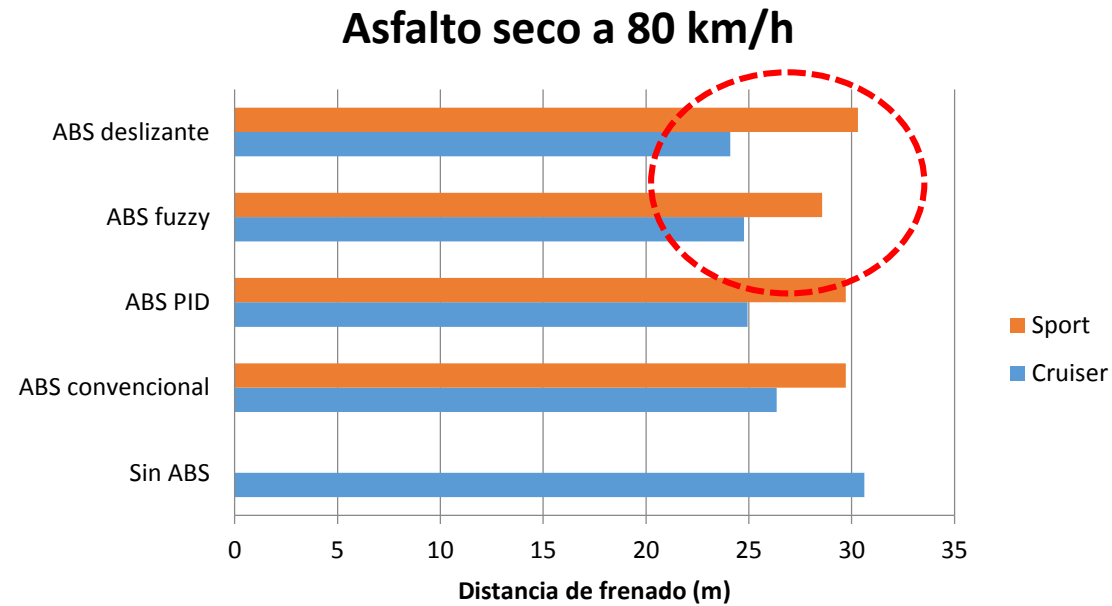


## Simulaciones: Deslizante / Sport – asfalto seco



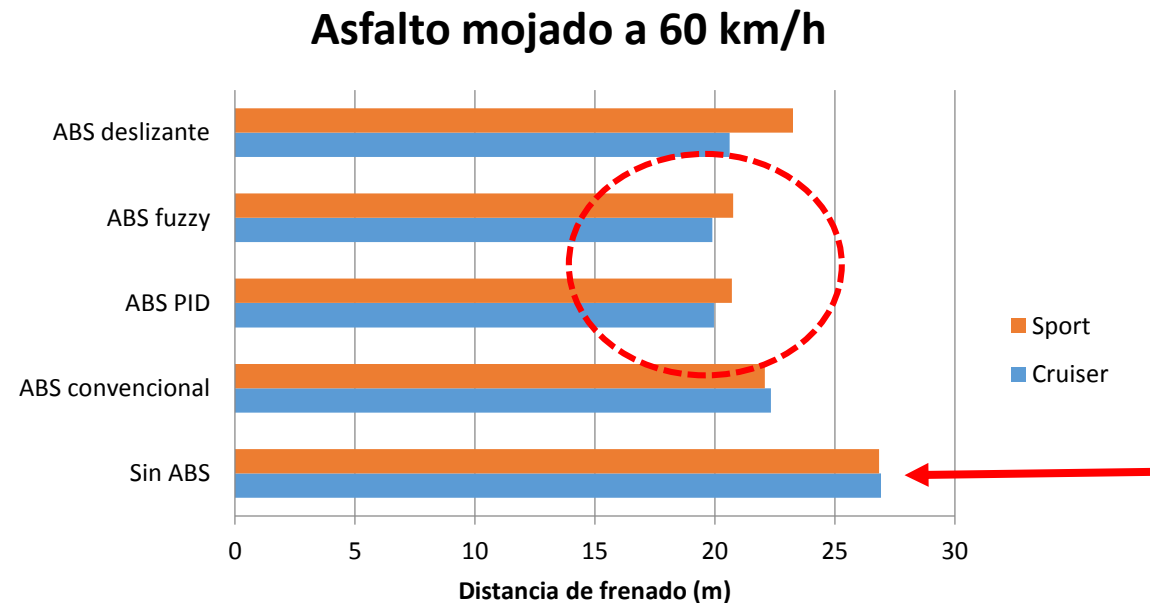
## Simulaciones: Comparativa

- En asfalto seco los algoritmos que mejores resultados dan son el control borroso y el modo deslizante.



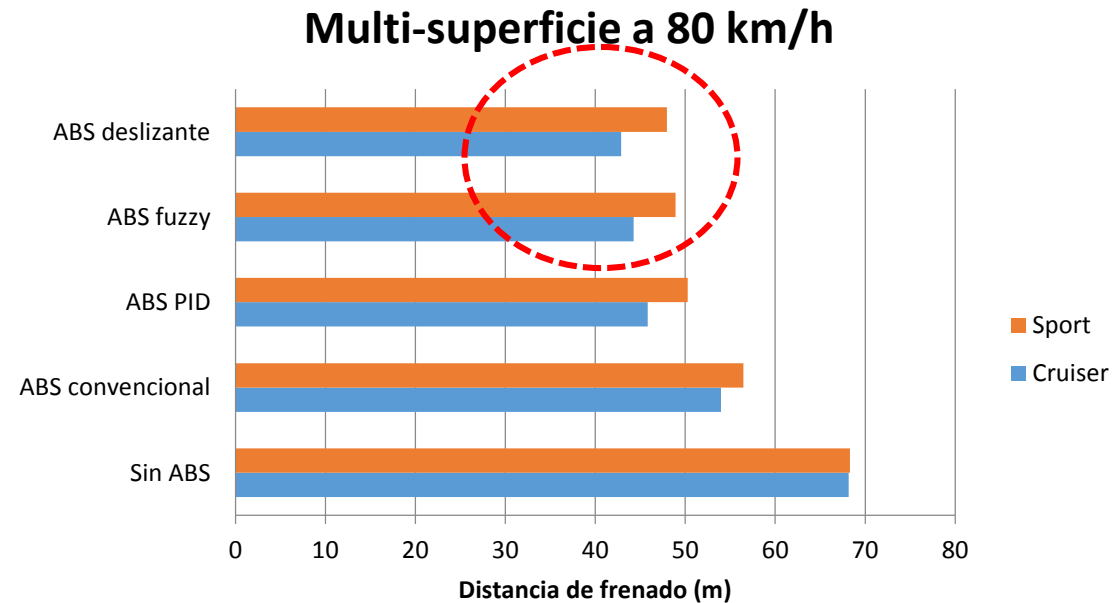
### Simulaciones: Comparativa

- En el caso de asfalto mojado a 60 km/h, el comportamiento del control en modo deslizante, borroso y PID es muy parecido, observándose que la tendencia al cabeceo de la motocicleta sport disminuye según se hace menor el coeficiente de adherencia.



### Simulaciones: Comparativa

- El ABS de control borroso y en modo deslizante mejora al resto en la frenada en una situación de multi-superficie.





### Conclusiones

- Se ha verificado que el uso de los sistemas ABS minimiza sustancialmente la distancia de frenado y que, por tanto, mejora la seguridad en la conducción en vehículos de dos ruedas.
- Dentro de las tipologías estudiadas se aprecia que los sistemas ABS convencionales reducen la distancia de frenado, sin embargo, no son suficientemente óptimos.
- Los controles borrosos y deslizantes ofrecen buenas prestaciones en casi todas las superficies.
- Los ABS para motocicletas son mejorables por la simple modificación de los parámetros del mismo. Lo ideal sería una sintonización de dichos parámetros para cada vehículo e incluso una modificación dinámica en el que se contemplen las distintas superficies donde el vehículo puede circular.
- En ciertos casos es necesario añadir un control del cabeceo para mejorar la seguridad.



### Conclusiones

- Se ha verificado que el uso de los sistemas ABS minimiza sustancialmente la distancia de frenado y que, por tanto, mejora la seguridad en la conducción en vehículos de dos ruedas.
- Dentro de las tipologías estudiadas se aprecia que los sistemas ABS convencionales reducen la distancia de frenado, sin embargo, no son suficientemente óptimos.
- Los controles borrosos y deslizantes ofrecen buenas prestaciones en casi todas las superficies.
- Los ABS para motocicletas son mejorables por la simple modificación de los parámetros del mismo. Lo ideal sería una sintonización de dichos parámetros para cada vehículo e incluso una modificación dinámica en el que se contemplen las distintas superficies donde el vehículo puede circular.
- En ciertos casos es necesario añadir un control del cabeceo para mejorar la seguridad.





### Conclusiones

- Se ha verificado que el uso de los sistemas ABS minimiza sustancialmente la distancia de frenado y que, por tanto, mejora la seguridad en la conducción en vehículos de dos ruedas.
- Dentro de las tipologías estudiadas se aprecia que los sistemas ABS convencionales reducen la distancia de frenado, sin embargo, no son suficientemente óptimos.
- Los controles borrosos y deslizantes ofrecen buenas prestaciones en casi todas las superficies.
- Los ABS para motocicletas son mejorables por la simple modificación de los parámetros del mismo. Lo ideal sería una sintonización de dichos parámetros para cada vehículo e incluso una modificación dinámica en el que se contemplen las distintas superficies donde el vehículo puede circular.
- En ciertos casos es necesario añadir un control del cabeceo para mejorar la seguridad.



### Conclusiones

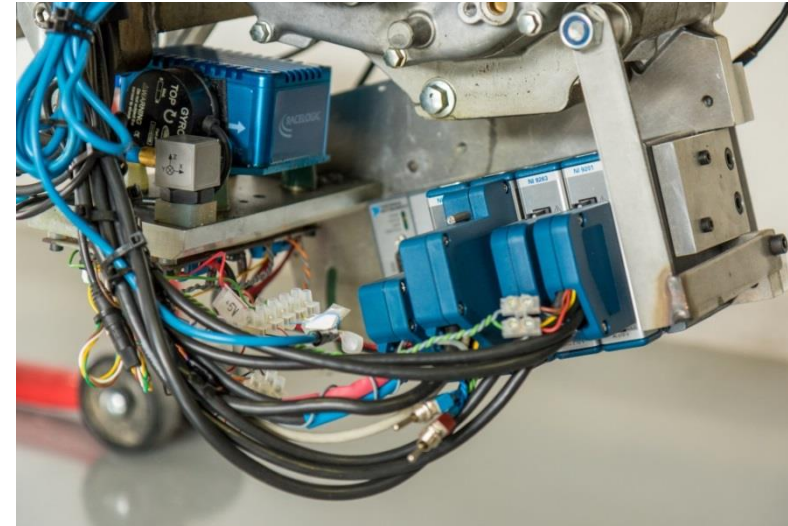
- Se ha verificado que el uso de los sistemas ABS minimiza sustancialmente la distancia de frenado y que, por tanto, mejora la seguridad en la conducción en vehículos de dos ruedas.
- Dentro de las tipologías estudiadas se aprecia que los sistemas ABS convencionales reducen la distancia de frenado, sin embargo, no son suficientemente óptimos.
- Los controles borrosos y deslizantes ofrecen buenas prestaciones en casi todas las superficies.
- Los ABS para motocicletas son mejorables por la simple modificación de los parámetros del mismo. Lo ideal sería una sintonización de dichos parámetros para cada vehículo e incluso una modificación dinámica en el que se contemplen las distintas superficies donde el vehículo puede circular.
- En ciertos casos es necesario añadir un control del cabeceo para mejorar la seguridad.



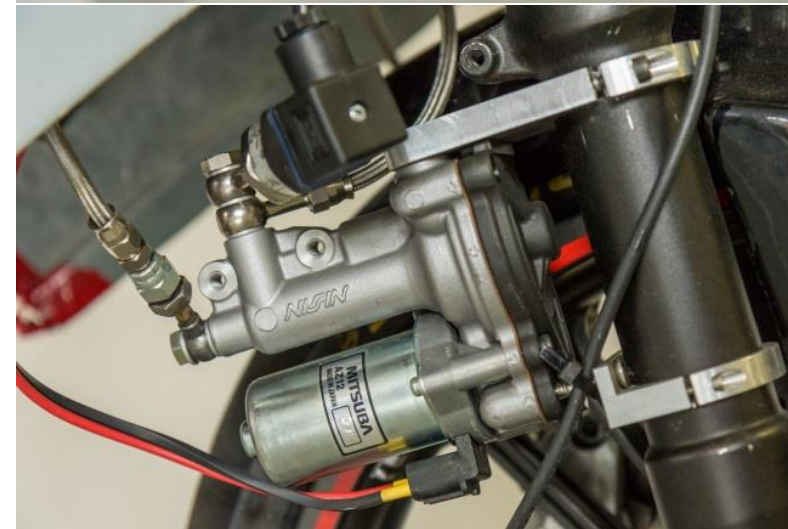
### Conclusiones

- Se ha verificado que el uso de los sistemas ABS minimiza sustancialmente la distancia de frenado y que, por tanto, mejora la seguridad en la conducción en vehículos de dos ruedas.
- Dentro de las tipologías estudiadas se aprecia que los sistemas ABS convencionales reducen la distancia de frenado, sin embargo, no son suficientemente óptimos.
- Los controles borrosos y deslizantes ofrecen buenas prestaciones en casi todas las superficies.
- Los ABS para motocicletas son mejorables por la simple modificación de los parámetros del mismo. Lo ideal sería una sintonización de dichos parámetros para cada vehículo e incluso una modificación dinámica en el que se contemplen las distintas superficies donde el vehículo puede circular.
- En ciertos casos es necesario añadir un control del cabeceo para mejorar la seguridad.

## Conclusiones: futuro – ensayos reales



Sistema en  
tiempo real



Control continuo de  
presión de frenado





UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## Evaluación de algoritmos de control para sistemas ABS en motocicletas



**Muchas gracias por su atención**

